

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.04.007

# 基于 AdvantEdge 的 7075-T651 铝合金铣削参数有限元仿真优化

邓辉<sup>1</sup>, 崔建昆<sup>2\*</sup>

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学上海-汉堡国际工程学院, 上海 200093)

**摘要:**为了在 7075-T651 铝合金铣削过程中控制铣削力和铣削温度,减小加工变形,笔者对不同铣削参数进行研究和优化。采用专业切削仿真软件 AdvantEdge 建立二维铣削仿真模型,对铣削力和铣削温度进行仿真分析,对所得到的铣削力和铣削温度的结果进行铣削实验验证;设计正交试验表获得优化的铣削参数组合,采用单因素试验法获得单一因素对铣削力和铣削温度的影响规律。结果表明:有限元仿真和实验数据误差在可接受范围内,说明了有限元模型的正确性;通过正交试验选出了控制铣削力和控制铣削温度的 2 组最优铣削参数组合;单因素试验的结果说明每齿进给量、铣削宽度和铣削深度的大小与铣削力的大小成正相关,而铣削力几乎不受主轴转速的影响;主轴转速、每齿进给量和铣削宽度的大小与铣削温度的高低成正相关,而铣削温度几乎不受铣削深度影响。

**关键词:**7075-T651 铝合金; AdvantEdge; 有限元仿真; 正交试验; 单因素试验

**中图分类号:**TH161.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2022)04-0040-07

## Finite Element Simulation Optimization of Milling Parameters of 7075-T651 Aluminum Alloy Based on AdvantEdge

DENG Hui<sup>1</sup>, CUI Jiankun<sup>2\*</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai-Hamburg International Engineering College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to control the milling force and milling temperature during the milling process of 7075-T651 aluminum alloy and thus reduce machining deformation, different milling parameters were studied and optimized. The two-dimensional milling simulation model was established by using the professional cutting simulation software AdvantEdge for the simulation analysis of the milling force and milling temperature results, and the milling experiments were carried out to verify the obtained results of the milling force and milling temperature. The orthogonal test table was designed to obtain an optimized combination of milling parameters, and the influence law of a single factor on the milling force and milling temperature was obtained by single factor test method. The results show that the errors of the finite element simulation and experimental data are within the acceptable range, which illustrates the correctness of the finite element model. The two optimal milling parameter combinations for controlling milling force and controlling milling temperature were selected by orthogonal test. The results of the single factor test show that the size of the feed per tooth, the milling width and the milling depth are positively correlated with the size of the milling force, and the milling force is almost unaffected by the spindle speed. The spindle speed, the feed per tooth and the size of the milling width are positively correlated with the milling temperature, and the milling temperature is almost unaffected by the milling depth.

**Keywords:** 7075-T651 aluminum alloy; AdvantEdge; finite element simulation; orthogonal test; single factor test

收稿日期:2021-04-18;修回日期:2022-05-25

第一作者简介:邓辉(1996),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要研究方向为精密加工。通信作者:崔建昆(1964),男,上海人,副教授,主要研究方向为齿轮传动及精密加工。E-mail:2941034073@qq.com

由于 7075-T651 铝合金拥有优秀的性能,加工成型性好,广泛用于航天器构件、支架以及导弹的舱体等,在工业领域有着不可替代的地位<sup>[1-2]</sup>。但由于其在加工过程中会出现弯曲、扭转或弯扭组合等变形,出现精度超差,严重影响了企业的加工生产效率;而铣削力和铣削温度对加工精度直接产生影响,为了满足生产和制造质量的要求,需要对二者进行控制<sup>[3-5]</sup>。数值模拟方法<sup>[6-8]</sup>在计算机技术快速发展的推动下,越来越多地使用在金属切削工艺研究中,不仅可以实时精确地检测铣削力和铣削温度的变化,还可以极大地节约人力和成本。

对于铣削加工过程的研究,王明海等<sup>[9]</sup>通过大量实验获得结果后推导铣削力和铣削温度的数学模型,这种做法会消耗大量的时间和成本,且铣削温度在实验过程中不能实时监测。Jomaa 等<sup>[10]</sup>利用 ABAQUS 软件对铣削过程进行二维仿真,虽然已对材料参数等进行了正确设置,但仿真结果还是与实验结果有一定误差,且没有对铣削参数进行进一步研究。肖田和周欣等<sup>[11-12]</sup>对不同材料的金属进行铣削有限元仿真,优化铣削参数来控制铣削过程中的铣削力和铣削温度,但并没有进行单一铣削参数对铣削力和铣削温度影响的研究。欧阳慧敏等<sup>[13]</sup>对 7050 铝合金进行铣削数值模拟,利用优化算法对工艺参数进行优化以减小加工变形量,并进行铣削实验验证优化结果的正确性。Craciunoiu 等<sup>[14]</sup>通过实验测量不同切削参数下切削加工的切削温度,发现切削速度为影响切削温度的主要因素,使用正交试验找出了切削温度最低的最优水平组合。

笔者利用 AdvantEdge 对 7075-T651 铝合金进行铣削仿真研究,得到一组铣削参数下的铣削仿真结果,将该结果与同一组铣削参数下的铣削实验结果进行对比,发现 2 者较为吻合,验证了仿真模型是准确的。以 4 个铣削参数为自变量设计正交试验表,对表中的仿真结果进行极差分析<sup>[15]</sup>,获得了控制铣削力和铣削温度的最优参数组合。同时,为获得单一因素对铣削力、铣削温度的影响程度,设计了单因素试验<sup>[16-17]</sup>并进行仿真研究。

## 1 建立有限元模型

铣削过程的简化模型如图 1 所示,由于在去除材

料的过程中,刀具随着主轴转动的同时自身又在沿着工件基面作进给运动,刀具每齿去除的材料逐渐变薄,去除部分为图 1 中的剖面线部分。

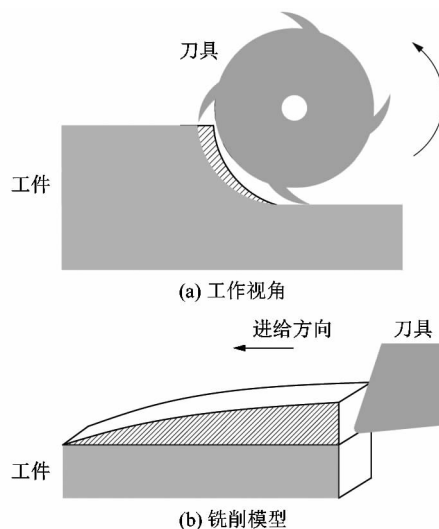


图 1 铣削简化模型

Figure 1 Milling simplification model

建立的二维铣削模型如图 2 所示。7075-T651 铝合金工件长度为 8 mm,宽度为 2 mm,刀具的材料选用硬质合金钢,直径为 8 mm,前角为 15°,后角为 6°,刀尖半径设置为 0.02 mm。有限元模型中最大网格尺寸为 0.10 mm,最小网格尺寸为 0.02 mm,对刀具前刀面、后刀面和工件上参与铣削的部分作网格细化处理。

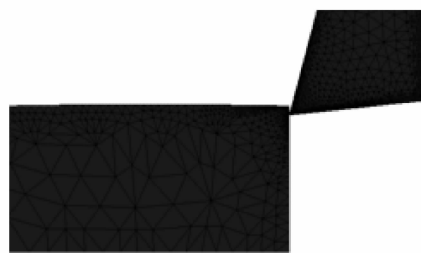


图 2 二维铣削有限元模型

Figure 2 2D Milling finite element model

采用如表 1 中所示的铣削参数进行仿真,铣削方式为顺铣,干铣削,环境介质温度设置为 20 °C。

表 1 仿真铣削参数

Table 1 Simulated milling parameters

| 铣削深度/mm | 铣削宽度/mm | 主轴转速/( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 每齿进给量/mm |
|---------|---------|------------------------------|----------|
| 0.8     | 6       | 6 000                        | 0.05     |

## 2 仿真结果分析

7075-T651 铝合金铣削仿真的铣削力结果如图 3 所示。从图中可以看出,当刀具刚切入工件后切向铣削力  $F_x$  和径向铣削力  $F_y$  快速增大,之后逐步达到稳定状态;在稳定铣削状态下 2 个方向上的铣削力会存在一定范围的波动,最后切向铣削力  $F_x$  逐渐减小,当刀具完全切出工件时,2 个方向上的铣削力变为零,这与实际铣削时铣削力变化的趋势规律较为吻合。取稳定铣削状态的铣削力数值的平均值作为铣削力结果。

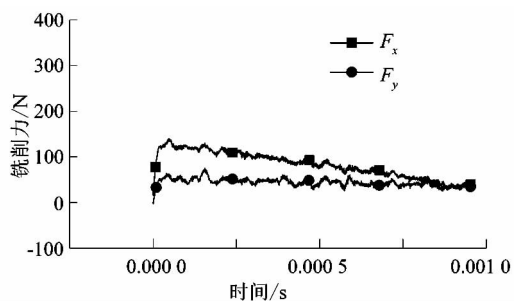


图 3 铣削力仿真结果

Figure 3 Simulation results of milling force

铣削仿真的铣削温度  $T$  结果如图 4 所示。从图中可以看出,铣削温度在工件上的分布分为几个梯度,提取工件靠近刀尖附近梯度上的各个点,将各个点上温度的平均值作为铣削温度的仿真结果。

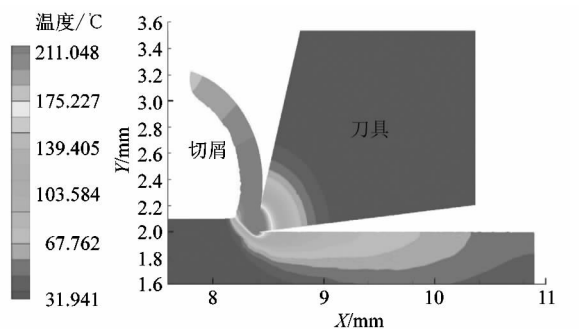


图 4 铣削温度仿真结果

Figure 4 Simulation results of milling temperature

将铣削仿真获得的铣削力与铣削温度进行处理,得到的结果如表 2 所示。

表 2 铣削仿真结果

Table 2 Milling simulation results

| $F_x$ /N | $F_y$ /N | $T$ /°C |
|----------|----------|---------|
| 64       | 44       | 134     |

## 3 铣削实验验证

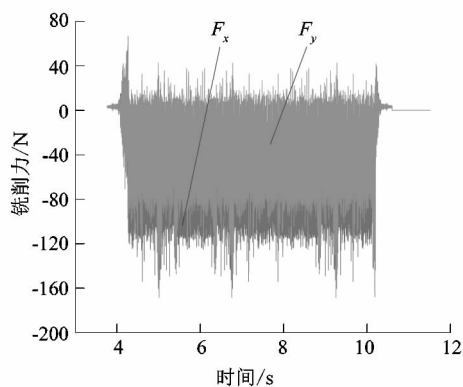
### 3.1 铣削力实验

实验采用的机床为 Carver S600A 立式铣床,铣削力的测量采用 Kistler 测力仪(9139A 型)。运用表 1 中的铣削参数进行如图 5 所示的铣削实验,对仿真结果进行验证。实验后得到的铣削力的结果曲线(取稳定波动阶段的平均值)如图 6 所示。

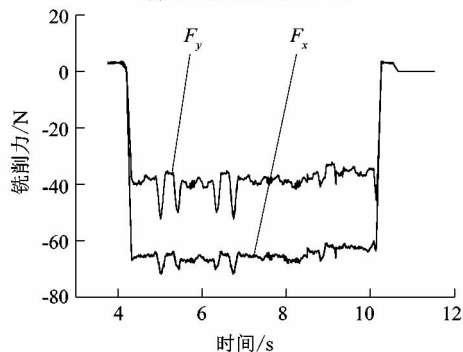


图 5 铣削力测量实验

Figure 5 Milling force measurement experiment



(a) 原始铣削力信号曲线



(b) 滤波后铣削力结果曲线

图 6 铣削力实验结果

Figure 6 Experimental results of milling force

实验测得的铣削力结果与仿真结果之间的误差如表 3 所示。

表 3 铣削力仿真与实验误差  
Table 3 Milling force simulation and experimental errors

| $F_x/N$ |      |      | $F_y/N$ |      |      |
|---------|------|------|---------|------|------|
| 仿真      | 实验   | 误差/% | 仿真      | 实验   | 误差/% |
| 64.0    | 65.5 | 2.3  | 44.0    | 40.8 | 7.3  |

由表 3 可知  $F_x, F_y$  的仿真结果与实验结果之间的误差分别为 2.3% 和 7.3%, 结果较为吻合, 说明仿真模型可实现对加工结果的模拟预测。

### 3.2 铣削温度实验

测试铣削温度所用的机床与上节一致, 铣削温度的测量使用 K 型热电偶丝, 测量铣削温度的步骤一般为: ①先将工件线切割成 2 半; ②在工件的测试点附近进行开槽; ③将 K 型热电偶丝放入测试点中并夹紧 2 半工件, 热电偶丝的放置如图 7 所示。

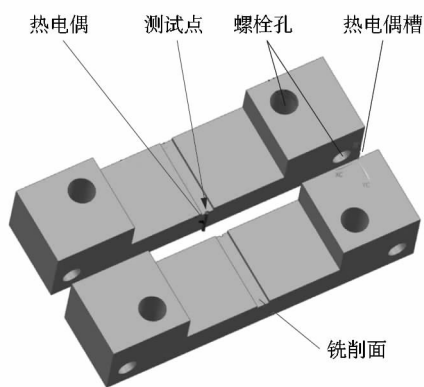


图 7 热电偶丝放置示意图  
Figure 7 Schematic diagram of thermocouple wire placement

铣削实验后测得的铣削温度曲线如图 8 所示。铣削在室温 20℃ 左右进行, 随着铣削过程的进行, 铣刀铣削至热电偶丝附近时, 热电偶丝附近工件表面的温度逐渐升高, 直到铣刀正好加工到热电偶丝位置时, 测试点的温度达到最高, 之后逐渐恢复至室温。取最高温度为铣削温度的结果。

实验测得的铣削温度和仿真结果之间的误差如表 4 所示。

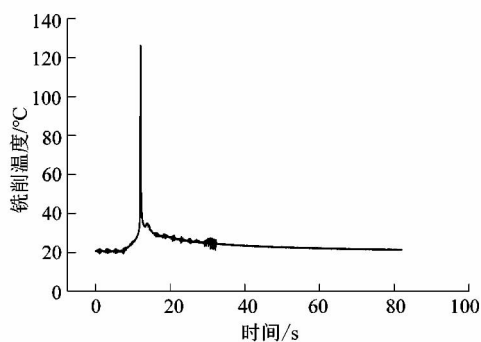


图 8 铣削温度实验结果

Figure 8 Milling temperature experimental results

表 4 铣削温度仿真与实验误差

Table 4 Milling temperature simulation and experimental errors

| 铣削温度/℃ |       | 误差/% |
|--------|-------|------|
| 仿真     | 实验    |      |
| 134.0  | 126.1 | 6.3  |

从表 4 中可知, 铣削仿真温度与实验测得温度之间的误差为 6.3%, 结果较为吻合, 可实现对铣削温度的模拟预测。

综上所述, 仿真得到的铣削力和铣削温度与铣削实验测得的结果都很接近, 验证了所建立的有限元模型的准确性。

## 4 正交试验设计

### 4.1 正交试验表

以 4 个铣削参数为自变量, 设计 4 因素 4 水平正交试验表, 如表 5 所示。

每一组试验都可以得到一组切向铣削力、径向铣削力和铣削温度, 得到 2 个方向的分力  $F_x$  和  $F_y$  后, 再通过计算求出铣削合力  $F_s$ 。正交试验每组得到的结果如表 6 所示。

### 4.2 极差分析

分析表 6 中不同铣削参数组合下铣削力和铣削温度的结果, 利用极差分析法对上表中得到的铣削合力  $F_s$  的仿真结果进行分析, 结果如表 7 所示。

通过比较表 7 中水平因子的极差  $R$  值大小, 可知对铣削力影响最显著的铣削参数为铣削深度, 对铣削力影响最小的因素是主轴转速。对铣削过程中铣削力

控制效果最好的工艺参数组合为铣削深度 0.4 mm,每齿进给量 0.05 mm,铣削宽度 2 mm,主轴转速 8 000 r/min。优选方案为  $A_1D_1B_1C_3$ 。对铣削温度  $T$  进行极差分析得到的结果如表 8 所示。

表 5 正交试验表

Table 5 Orthogonal test table

| 试验<br>编号 | 铣削深度<br>$A/\text{mm}$ | 铣削宽度<br>$B/\text{mm}$ | 主轴转速<br>$C/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 每齿进给量<br>$D/\text{mm}$ |
|----------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------------------|------------------------|
| 1        | 0.4                   | 2                     | 4 000                                        | 0.05                   |
| 2        | 0.4                   | 4                     | 6 000                                        | 0.01                   |
| 3        | 0.4                   | 6                     | 8 000                                        | 0.15                   |
| 4        | 0.4                   | 8                     | 10 000                                       | 0.20                   |
| 5        | 0.6                   | 2                     | 6 000                                        | 0.15                   |
| 6        | 0.6                   | 4                     | 4 000                                        | 0.20                   |
| 7        | 0.6                   | 6                     | 10 000                                       | 0.05                   |
| 8        | 0.6                   | 8                     | 8 000                                        | 0.10                   |
| 9        | 0.8                   | 2                     | 8 000                                        | 0.20                   |
| 10       | 0.8                   | 4                     | 10 000                                       | 0.15                   |
| 11       | 0.8                   | 6                     | 4 000                                        | 0.10                   |
| 12       | 0.8                   | 8                     | 6 000                                        | 0.05                   |
| 13       | 1.0                   | 2                     | 10 000                                       | 0.10                   |
| 14       | 1.0                   | 4                     | 8 000                                        | 0.05                   |
| 15       | 1.0                   | 6                     | 6 000                                        | 0.20                   |
| 16       | 1.0                   | 8                     | 4 000                                        | 0.15                   |

表 6 正交试验结果

Table 6 Orthogonal test results

| 试验编号 | $F_x/\text{N}$ | $F_y/\text{N}$ | $F_s/\text{N}$ | $T/^\circ\text{C}$ |
|------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| 1    | 19.53          | 12.82          | 23.36          | 139.98             |
| 2    | 40.12          | 18.60          | 44.22          | 180.38             |
| 3    | 60.96          | 23.08          | 65.18          | 230.39             |
| 4    | 77.55          | 26.77          | 82.04          | 254.21             |
| 5    | 64.49          | 29.25          | 70.81          | 185.11             |
| 6    | 105.34         | 36.87          | 111.61         | 191.48             |
| 7    | 37.48          | 21.36          | 43.14          | 181.21             |
| 8    | 64.69          | 29.50          | 71.10          | 222.49             |
| 9    | 107.26         | 44.34          | 116.06         | 208.42             |
| 10   | 112.52         | 44.28          | 120.92         | 232.72             |
| 11   | 88.36          | 39.02          | 96.60          | 156.59             |
| 12   | 64.11          | 44.66          | 81.10          | 133.97             |
| 13   | 81.67          | 43.79          | 92.67          | 213.30             |
| 14   | 58.54          | 34.43          | 67.91          | 157.76             |
| 15   | 204.79         | 68.14          | 215.83         | 201.78             |
| 16   | 151.75         | 57.30          | 162.21         | 167.76             |

通过分析表 8 可知每齿进给量对铣削温度影响最显著,铣削宽度对铣削温度影响最小。铣削过程中铣削温度控制最好的工艺参数组合为每齿进给量 0.05 mm,主轴转速 4 000 r/min,铣削深度 1.0 mm,铣削宽度 2 mm。优选方案为  $D_1C_1A_4B_1$ 。

表 7 铣削力仿真结果分析

Table 7 Milling force simulation results analysis

| 因素  | 铣削力/N  |        |        |        |       |        |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
|     | $K_1$  | $K_2$  | $K_3$  | $K_4$  | $k_1$ | $k_2$  | $k_3$  | $k_4$  | 极差 $R$ |
| $A$ | 214.80 | 296.66 | 414.68 | 538.62 | 53.70 | 74.17  | 103.67 | 134.66 | 80.96  |
| $B$ | 302.90 | 344.66 | 420.75 | 396.35 | 75.73 | 86.17  | 105.19 | 99.09  | 29.46  |
| $C$ | 393.78 | 411.96 | 320.25 | 338.77 | 98.45 | 102.99 | 80.06  | 84.69  | 22.93  |
| $D$ | 215.51 | 304.59 | 419.12 | 525.54 | 53.88 | 76.15  | 104.78 | 131.39 | 77.51  |

注:4 个水平下铣削合力之和分别为  $K_1, K_2, K_3$  和  $K_4$ ;其平均值分别为  $k_1, k_2, k_3$  和  $k_4$ 。

表 8 铣削温度仿真结果分析

Table 8 Milling temperature simulation results analysis

| 因素  | 铣削温度/ $^\circ\text{C}$ |        |        |        |        |        |        |        |         |
|-----|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
|     | $K'_1$                 | $K'_2$ | $K'_3$ | $K'_4$ | $k'_1$ | $k'_2$ | $k'_3$ | $k'_4$ | 极差 $R'$ |
| $A$ | 804.96                 | 780.29 | 748.70 | 740.60 | 201.24 | 195.07 | 187.18 | 185.15 | 16.09   |
| $B$ | 746.81                 | 762.34 | 769.97 | 795.43 | 186.70 | 190.59 | 192.49 | 198.86 | 12.16   |
| $C$ | 655.81                 | 718.24 | 819.06 | 881.44 | 163.95 | 179.56 | 204.77 | 220.36 | 56.41   |
| $D$ | 629.92                 | 772.76 | 815.98 | 855.89 | 157.48 | 193.19 | 204.00 | 213.97 | 56.49   |

注:4 个水平下铣削温度之和分别为  $K'_1, K'_2, K'_3$  和  $K'_4$ ;其平均值分别为  $k'_1, k'_2, k'_3$  和  $k'_4$ 。

根据表 7~8 的数据,选取出了铣削过程中控制铣削力和铣削温度的 2 组最好的工艺参数组合,可有效地改善加工质量。

## 5 单因素试验法

### 5.1 试验方案设计与结果

已经通过正交试验法得到了 4 个水平因子对铣削力和铣削温度影响程度的主次关系,也选取了控制铣削力和铣削温度的最优参数。为了进一步分析每一个铣削参数在铣削过程中对铣削力和铣削温度的影响程度,笔者利用单因素实验法进行仿真研究,在其他铣削参数不变的情况下改变其中的一个铣削参数进行仿真试验。仿真方案如表 9 所示,每个铣削参数选用 3 个水平值。

表 9 单因素试验仿真方案

Table 9 Simulation scheme of single factor test

| 试验编号 | 主轴转速/<br>( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 每齿进给<br>量/mm | 铣削深<br>度/mm | 铣削宽<br>度/mm |
|------|----------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| 1    | 6 000                            | 0.15         | 0.6         | 4           |
| 2    | 8 000                            | 0.15         | 0.6         | 4           |
| 3    | 10 000                           | 0.15         | 0.6         | 4           |
| 4    | 6 000                            | 0.10         | 0.6         | 4           |
| 5    | 6 000                            | 0.15         | 0.6         | 4           |
| 6    | 6 000                            | 0.20         | 0.6         | 4           |
| 7    | 6 000                            | 0.15         | 0.4         | 4           |
| 8    | 6 000                            | 0.15         | 0.6         | 4           |
| 9    | 6 000                            | 0.15         | 0.8         | 4           |
| 10   | 6 000                            | 0.15         | 0.6         | 2           |
| 11   | 6 000                            | 0.15         | 0.6         | 4           |
| 12   | 6 000                            | 0.15         | 0.6         | 6           |

经过对表 9 中每组铣削参数的仿真,得到如表 10 所示的单因素试验结果。

表 10 单因素试验仿真结果

Table 10 Simulation results of single factor tests

| 试验编号 | $F_x/N$ | $F_y/N$ | $T/^\circ\text{C}$ |
|------|---------|---------|--------------------|
| 1    | 126.77  | 45.27   | 160.58             |
| 2    | 123.38  | 41.93   | 203.52             |
| 3    | 125.97  | 42.40   | 253.39             |
| 4    | 87.25   | 33.91   | 182.14             |
| 5    | 126.71  | 45.31   | 206.66             |
| 6    | 160.05  | 48.55   | 230.19             |
| 7    | 84.24   | 30.22   | 202.49             |
| 8    | 126.51  | 45.33   | 203.37             |
| 9    | 169.02  | 60.37   | 202.47             |
| 10   | 110.30  | 40.91   | 194.48             |
| 11   | 119.65  | 41.92   | 202.74             |
| 12   | 126.01  | 45.11   | 212.06             |

### 5.2 单一铣削参数对铣削力的影响

根据表 10 中的仿真结果分析,可以得到如图 9 所示的关于铣削力的影响曲线。从转速曲线看,当水平 1 变至水平 3,即主转速从 6 000  $r/\min$  到 10 000  $r/\min$  时,切向铣削力  $F_x$  从 126.77 N 降低到 125.97 N,基本保持不变;径向铣削力  $F_y$  随主轴转速的增大稍微有一些降低,因此铣削力几乎不受主轴转速的影响。从每齿进给量曲线看,水平 1 到水平 3,即每齿进给量从 0.1 mm 到 0.2 mm 时,  $F_x$  从 87.25 N 增加到 160.05 N;  $F_y$  从 33.91 N 增加到 48.55 N,都有很大幅度的增长。从铣削深度曲线看,水平 1 到水平 3,即铣削深度从 0.4 mm 到 0.8 mm,  $F_x$  从 84.24 N 增加 169.02 N;  $F_y$  从 30.22 N 直接增加到 60.37 N,增幅几乎翻倍。从铣削宽度曲线看,水平 1 到水平 3,即铣削宽度从 2 mm 到 6 mm 时,  $F_x$  从 110.30 N 增加到 126.01 N;  $F_y$  从 40.91 N 增加到 45.11 N,增幅较小但也呈增长趋势。

由图 9 可知,铣削力几乎不受主轴转速的影响,铣削力会随着每齿进给量的增加大幅度增长,因为刀具每转动 1 周所需切除的材料增多,导致铣削力增大,铣削深度对铣削力的影响最显著,呈正相关关系,对铣削力影响最小的因素为铣削宽度,虽然涨幅不大,但总体呈现增长趋势。

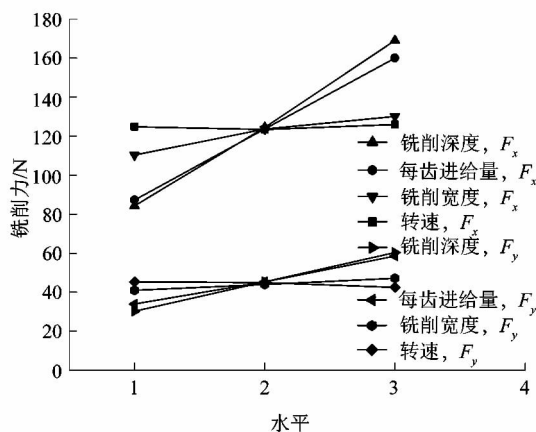


图 9 铣削参数对铣削力的影响曲线

Figure 9 Influence curve of milling parameters on milling forces

### 5.3 单一铣削参数对铣削温度的影响

单个因素对铣削温度的影响曲线如图 10 所示。从图中可以看出,从转速曲线看,水平 1 变到水平 3

时,铣削温度从 160.58 ℃ 升高至 253.39 ℃,增加了约 93 ℃,增幅是 4 个因素中最大的。从每齿进给量曲线看,当水平 1 到水平 3 时,铣削温度从 182.14 ℃ 升高至 230.19 ℃,增加了 48 ℃,增幅在 4 个因素对铣削温度的影响中排第 2。从铣削深度曲线看,当水平 1 到水平 3 时,铣削温度从 202.49 ℃ 先小幅增大到 203.37 ℃,再回到 202.47 ℃,铣削温度几乎无变化。从铣削宽度曲线看,当水平 1 变到水平 3 时,铣削温度从 194.48 ℃ 到 212.06 ℃,增加了约 18 ℃,增幅在 4 个影响因素中排第 3。

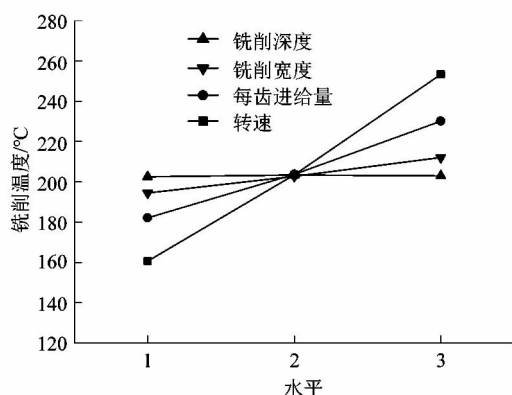


图 10 铣削参数对铣削温度的影响曲线

Figure 10 Influence curve of milling parameters on milling temperature

## 6 结论

通过建立二维铣削仿真模型,笔者对 7075-T651 铝合金进行了铣削仿真,使用同一铣削参数进行铣削实验,验证仿真得到的铣削力与铣削温度结果,获得了以下结论:

1) 铣削力和铣削温度的仿真结果与实验结果误差分别为 2.3% 和 7.3%,说明建立的仿真模型可准确地进行预测模拟;

2) 设计正交试验表进行仿真,仿真结果经过极差分析后获得控制铣削力和铣削温度的 2 组最佳水平组合;

3) 为获得单一因素对铣削力和铣削温度的影响,设计单因素试验,得出在实际加工过程中为了控制铣削力,应当采用尽可能小的每齿进给量、铣削深度和铣削宽度,较高的主轴转速;为了控制铣削温度,铣削深度应当尽可能的大,主轴转速、铣削宽度和每齿进给量

尽可能小。

## 参考文献:

- [1] 刘玉平. 2A12 铝合金中高速铣削的工艺研究[J]. 航空制造技术, 2007(5):1.
- [2] 邵坤鹏. 基于神经网络与遗传算法的航空铝合金高速铣削参数优化研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2021:1.
- [3] 郑耀辉,王朋,刘娜. 7075 铝合金铣削参数优化仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2020(5):171-174. DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2020.05.042.
- [4] 杨建江,何立东,陈钊,等. 薄壁工件铣削加工振动主动控制实验研究[J]. 机电工程, 2021,38(5):592-598.
- [5] LIU G. Study on deformation of titanium thin-walled part in milling process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(6):2788-2793. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.029.
- [6] 丁悦,刘畅. 航空结构件铣削加工变形仿真技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2019,62(3):81. DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.03.081.
- [7] 杜红春,张祺. 钛合金切削加工参数优化数学模型及工艺参数分析研究[J]. 机电工程, 2020,37(11):1280-1287.
- [8] 李西宁,王悦舜,李玉华,等. 基于遗传算法的飞机弱刚性件夹持方案优化设计[J]. 航空制造技术, 2019,62(增刊1):82. DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.01/02.082.
- [9] 王明海,于超,单宝峰. K477 镍基高温合金切削加工预测模型的建立及切削参数优化[J]. 机械设计与制造, 2012(4):207-209. DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2012.04.077.
- [10] JOMAA W, MECHRI O, LEVESQUE J, et al. Finite element simulation and analysis of serrated chip formation during high-speed machining of AA7075-T651 alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017,26:446-458. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.015.
- [11] 肖田,王怀峰,武文革. 基于 AdvantEdge 的钛合金 Ti6Al4V 的高速铣削有限元仿真[J]. 煤矿机械, 2012,33(5):138-140. DOI:10.13436/j.mkjx.2012.05.141.
- [12] 周欣,王鹏,杨昆明. 铝合金 7075-T6 铣削加工有限元仿真分析[J]. 煤矿机械, 2018,39(9):72-74. DOI: 10.13436/j.mkjx.201809025.
- [13] 欧阳慧敏,张新丰,彭文飞,等. 铝合金 7050 切削过程的数值模拟与试验[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020,17(3):102-107. DOI: 10.16772/j.cnki.1673-1409.2020.03.017.
- [14] CRACIUNOIU N, PATRU EN, ROSCA AS, et al. Optimization of the process parameters in milling of aluminum alloys[J]. Applied Mechanics and Materials, 2020, 896:293-298. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.896.293.
- [15] 赵朋,崔建昆,雷华泽. 基于正交试验的钛合金切削仿真和工艺研究[J]. 机械工程师, 2022(3):113.
- [16] 蔡明,巩亚东,于宁,等. 铝合金 6061 微尺度铣削的铣削力仿真与实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018,39(1):80.
- [17] 李元镇,程祥,孟繁杰,等. PMMA 微铣铣削参数优化实验研究[J]. 制造技术与机床, 2016(2):23. DOI: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2016.02.007.